

УДК 620.9-6

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СПАЛЮВАННЯ БУРОГО ВУГІЛЛЯ В ПЕРЕДТОПКАХ

**В. А. Рогачов**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: [teram57@meta.ua](mailto:teram57@meta.ua)**С. А. Рева\***E-mail: [reva\\_sergey89@mail.ru](mailto:reva_sergey89@mail.ru)**М. В. Ванджура\***E-mail: [teram57@meta.ua](mailto:teram57@meta.ua)\*Кафедра атомних електростанцій  
і інженерної теплофізикиНаціональний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

*Розглянуті сучасні методи спалювання бурого вугілля. А саме, порівнюються способи термічної обробки твердого палива у передтопках: в нерухомому або рухомому щільному шарі; в киплячому шарі; в циркулюючому киплячому шарі; у вихорі. Показано, що найкращим методом для спалювання бурого вугілля є вихровий, або циклонний*

**Ключові слова:** передтопок, буре вугілля, методи спалювання, киплячий шар, щільний шар, циркулюючий киплячий шар

*Рассмотрены современные методы сжигания бурого угля. А именно, сравниваются способы термической обработки твердого топлива в передтопках: в неподвижном или подвижном плотном слое; в кипящем слое; в циркулирующем слое; в вихре. Показано, что наилучшим методом для сжигания бурого угля является вихревой, или циклонный*

**Ключевые слова:** предтопок, бурый уголь, методы сжигания, кипящий слой, плотный слой, циркулирующий слой

## 1. Вступ

Однією з проблем України є стрімке зростання цін на вуглеводневі палива до світового рівня при збереженні фіксованих обсягів потреб в енергоресурсах у споживачів. Загострюється проблема витіснення природного газу та мазуту з енергетики із заміщенням місцевим, твердим паливом. Якщо на ТЕЦ цю проблему в цілому вирішено, то комунальні та промислові котельні лишаються одним з основних споживачів газу та мазуту.

В Україні працює близько 30 тисяч комунальних та промислових котлоагрегатів малої і середньої потужності, і лише третина з них спалює тверде паливо, решта здебільшого використовує природний газ. Пряме переведення таких котлів на спалювання вугілля неможливе. Реакційна здатність, або питома швидкість горіння при однаковій температурі, для мазуту є більшою, ніж для вугілля, а для природного газу – ще більшою. Чим вища питома швидкість горіння палива, тим менший час перебування в топці потрібний для його повного згорання. Тому доцільно використовувати передтопки. Так як більша частина цих котлоагрегатів не повністю відпрацювала свій ресурс, та неможливо їх замінити в короткий термін, то виникає потреба продовження терміну їх експлуатації. Одним з напрямком вирішення цієї проблеми є встановлення перед котлоагрегатами передтопок для ефективного спалювання твердого палива.

Іншою проблемою в Україні є дефіцит якісного вугілля. Це пов'язано не тільки з відсутністю капіталовкладень на розробку нових пластів та будівництво нових шахт, але і з спрямуванням частини вугілля на заміщення природного газу на ТЕС. Тому спеціалісти в галузі котлобудування змушені зробити акцент на

такі додаткові види палива, як відходи біомаси, торф та низькокалорійне буре вугілля [1, 2]. Потенціал біомаси, включно з твердими побутовими відходами, і бурого вугілля – надзвичайно високий і міг би покрити всі потреби в енергоресурсах. Однак використання цього потенціалу ускладнюється відсутністю ефективних енерготехнологій. Зараз Україні працює ряд передтопоків та топків щільного, фонтануючого та низько температурного киплячого шару для газифікації та спалювання біомаси [3, 4]. Передтопки для спалювання бурого вугілля та торфу в промислових та комунальних котельнях відсутні.

Можна виділити такі основні способи термічної обробки твердого палива у передтопках:

- в нерухомому або рухомому щільному шарі;
- в киплячому шарі (КШ);
- в циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ);
- у вихорі (циклоні).

Передтопки, які вже набули широкого досвіду експлуатації в світі представлені нижче.

## 2. Передтопки зі щільним шаром

Спалювання твердого палива у щільному шарі [5, 6] відбувається на колосниковій решітці. В шарі можливе спалювання тільки кускового палива, такого як: буре та кам'яне вугілля, брикетований торф, горючі сланці, деревина. Паливо завантажується на решітку щільним шаром. Горіння палива відбувається у потоці повітря, яке пронизує цей шар знизу вверх. Паливо може спалюватися на нерухомій колосниковій решітці, або на решітці, що рухається.

Передтопок (рис. 1), призначений для спалювання відходів деревини, стружки, щепи, тирси з вологістю до 60% на нерухомій колосниковій решітці та сполучення з котлами-утилізаторами.

Перевагою передтопка є простота теплової схеми: його охолодження здійснюється повітрям, яке подається на горіння палива. Недоліками передтопка є те, що в ньому можливе спалювання тільки кускового палива, що потребує відповідної підготовки чи класифікації, а також наявність колосникової решітки, яка з часом прогорає.

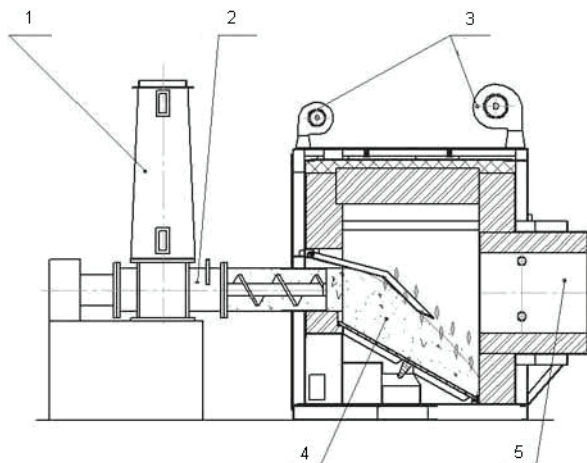


Рис. 1. Схематичне зображення передтопка: 1 – накопичувальний бункер; 2 – транспортер шнековий; 3 – вентилятори первинного та вторинного повітря; 4 – шар палива; 5 – вихід димових газів в котел

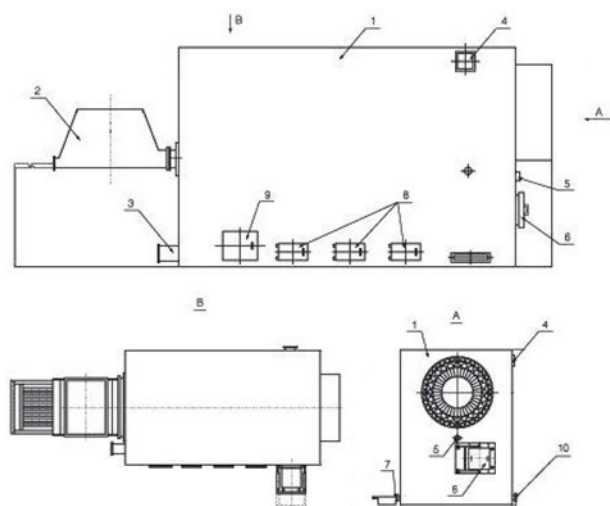


Рис. 2. Передтопок з нахиленими рухомими колосниками КАР: 1 – корпус; 2 – проміжний бункер з шнековим транспортером; 3 – подача первинного повітря; 4 – подача вторинного повітря; 5 – оглядове вікно; 6 – дверця передтопка; 7 – привід транспортера золи; 8, 9 – дверця золи; 10 – видалення золи

Передтопок з нахиленими рухомими колосниками КАР (Латвія) (рис. 2), призначений для спалювання відходів деревини та суміші відходів деревини і тор-

фу. Передтопок складається з футерованої камери з розміщеними в нижній частині нахиленими рухомими колосниками.

При переміщенні частинки палива частково перемішуються, що сприяє їх вигорянню, - це є найбільшою перевагою передтопка, але потребує складного механізму руху колосників.

У передтопку можливе спалювання гранул деревини, гранул деревини з домішками соломи, сухої трави, щепи, щепи з 30% тирси, щепи з 30% фрезерного торфу, щепи з 70% кускового торфу.

### 3. Передтопки киплячого шару

Спосіб спалювання твердого палива у киплячому шарі займає проміжне місце між спалюванням у факелі та щільному шарі. Зі способом спалювання у щільному шарі його поєднує насамперед можливість спалювання не змеленого (подрібненого) палива та наявність решітки, через яку подають повітря. При підвищенні швидкості повітря, яке продувається через шар палива, настає момент, коли аеродинамічна сила, що діє на кожну частинку палива, переборює вагу і силу тертя частинок між собою. Подальше збільшення витрати повітря приводить до псевдозрідження частинок палива.

Інтенсивне перемішування твердих частинок під дією зріджуючого повітря забезпечує інтенсивний тепло- та масообмін у шарі. Занурені у шар поверхні нагріву дозволяють підтримувати температуру на такому рівні, який не призводить до шлакування шару та поверхонь нагріву. Важливо відзначити, що в киплячому шарі кількість горючого матеріалу складає, як правило, невелику частку від маси шару, основу якого складає інертний матеріал або зола палива (при спалюванні високозольного вугілля).

Переваги спалювання твердого палива в КШ:

- забезпечення високого коефіцієнту теплопередачі;
- спалювання вугілля з підвищеною зольністю;
- можливе спалювання без системи пилоприготування, що знижує капітальні витрати на допоміжне обладнання, ремонтні і експлуатаційні витрати;
- додавання  $\text{CaCO}_3$  у шар частково зв'язує сірку палива з зольним залишком, що знижує викиди  $\text{SO}_2$  з димовими газами в атмосферу;
- низькі температури у шарі (800–950 °С) забезпечують відсутність генерації термічних оксидів азоту, що знижує викиди  $\text{NO}_x$  в атмосферу.

Відомий досвід західногерманських енергетиків у створенні передтопків з киплячим шаром, що працюють на ТЕС Фолклінген (ФРН) [7]. У передтопках (рис. 3) спалюють відходи вуглезабагачення із зольністю 60% та вологістю 20%. Передтопок має чотири паливозакидаючі пристрої та чотири пальники над шаром для розігріву цегляної кладки, а також (при необхідності) для стабілізації процесу горіння. Паливо закидається на шар з постійною витратою, до закидаючих пристроїв подається транспортером, що працює під тиском. Продукти згоряння з КШ-передтопка при температурі 850 – 900 °С через футеровані вогнетривкою цеглою циліндричні коробки поступають в топку котла під нижнім ярусом вихрових пальників, в яких спалюється високоякісне кам'яне вугілля. Тепломісткість продуктів

згоряння складає близько 20% тепловиділення в топці при номінальному навантаженні котла. Таким чином, за допомогою КШ-передтопок шару спалюється менш якісне високозольне вугілля та зменшується витрата більш дорогого якісного вугілля.

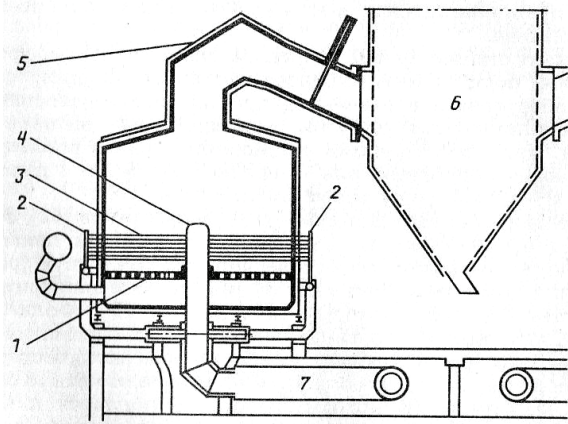


Рис. 3. Передтопок з киплячим шаром на ТЕС Фолклінген (ФРН): 1 – повіторозподільна решітка; 2 – зовнішній колектор; 3 – занурена поверхня нагріву; 4 – центральний колектор; 5 – вихідний патрубок; 6 – топка котла; 7 – коаксіальний короб

Недоліки цих передтопоків в тому, що поверхні нагріву охолоджуються повітрям, яке потім потрібно використовувати, наприклад, у газовій турбіні, а для створення поверхні нагріву потрібно використовувати жаростійкі матеріали, що здорожує пристрій.

Досвід експлуатації котлів компанія «ІНЕКО» (Росія), що оснащені КШ-передтопками, показав ряд переваг у порівнянні з факельно-шаровою схемою при спалюванні низькосортних палив:

- котли з КШ передтопками забезпечують більш ефективне спалювання низькосортних палив, за рахунок збільшення часу перебування палива у зоні;
- оснащення котла екранованим КШ-передтопом забезпечує додаткову генерацію пари (до 10-15% від загальної паропроодуктивності котла), що дозволяє: досягти заданої паропроодуктивності при меншій висоті топки; збільшити паропроодуктивність котла при розміщенні у існуючій будівлі; знизити температуру димових газів на виході з топки.

#### 4. Передтопки циркулюючого киплячого шару

На прикладі передтопоків зі щільним та киплячим шаром можна побачити, що в них реалізується здебільшого процес газифікації або неповного згоряння. Це викликано тим, що при використанні котла як утилізатора його теплове напруження не задовольняє вимогам теплосприйняття. Це можна вирішити, переносячи частину горіння, а саме, продуктів газифікації, до топки котла. Але при цьому до топки переноситься і твердий винос. Тому вищенаведені схеми більш придатні для котлів, які мають від початку систему золовидалення.

Передтопки ЦКШ з піролізером в контурі циркуляції золи здатні повністю спалювати вугілля, так що основна частина золи виводиться з перед-

топка. Але при цьому до топки котла надходять не тільки продукти згоряння, а ще й горючі продукти піролізу. Крім того, в ЦКШ-передтопках з'являється можливість зв'язування сполук сірки вапняком, який розкладається в зоні горіння передтопка до  $\text{CaO}$  і зв'язує сірку ще в піролізері, так що в топку котла надходить менше 10% від усієї кількості сірки палива.

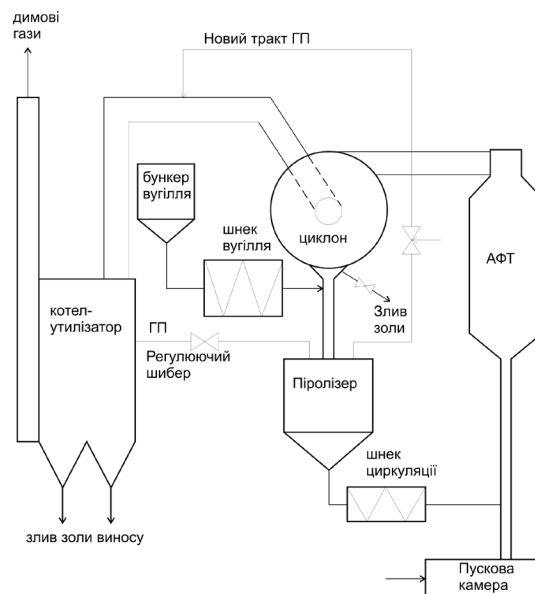


Рис. 5. Принципова схема передтопка з циркулюючим аерофонтануючим шаром продуктивністю по вугіллю до 1т/год

На рис. 5 наведено принципову схему передтопка розробки ЕНІН ім. Кржижановського (Москва, Росія) та "Південьтехенерго" (Львів), реалізовану в с.Верхне-Синеви́днє [8]. Подібні передтопки були встановлені на котлах Добротвірської ТЕС. Дослідження Інституту вугільних енерготехнологій [9, 10] показали можливість відгонки до 80% легких вугілля у вигляді середньо калорійної парогазової суміші і зв'язування більше 90% сірки в піролізері. При цьому з передтопка виводилось більше 80% золи палива.

Основним недоліком ЦКШ-передтопоків є габаритні розміри, які у випадку сполучення, наприклад, з котлом ДКВР перевищують розміри самого котла. Це пов'язане з необхідністю розміщення піролізера під циклоном.

#### 5. Циклонні передтопки

В циклонних передтопках можливе спалювання твердого палива з відносно великою кількістю легких речовин, подрібнене до 4-6 мм.

Циклонний спосіб спалювання твердого палива заснований на використанні закручених паливоповітряних потоків [5, 6] і полягає у тому, що у горизонтальному або вертикальному передтопку утворюється відносно невеликих розмірів газоповітряний вихор, в якому частинки палаючого палива багаторазово обертаються до тих пір, поки вони не згорять майже повністю. Під дією відцентрових сил частинки палива рухаються у

вигляді ущільненого пристінного слою, інтенсивно перемішуючись з повітрям. Час перебування частинок палива в циклонній камері вибирається достатнім для вигорання грубого пилу (розмір частинок до 200 мкм) або подрібненого палива (розмір частинок до 5 мм). Продукти згоряння з циклонних передтопок при спалюванні твердого палива, як правило, далі надходять до камери допалювання, а з неї до топки котла, де охолоджуються. Шлак з передтопок, як правило, видаляється у рідкому стані через льотки, причому для збільшення кількості вловленого шлаку між камерою догорання та топкою або між циклонними передтопками та камерою допалювання встановлюють шлаковловлюючий пучок труб (рис. 6).

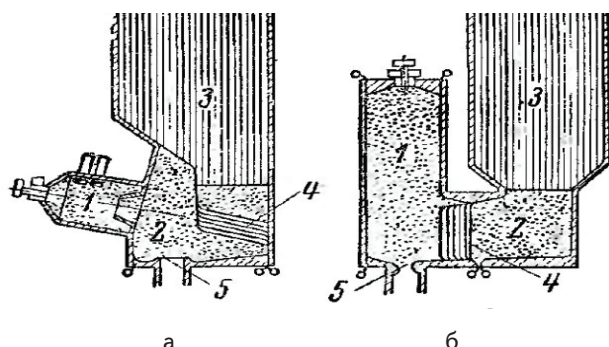


Рис. 6. Циклонні передтопки з топкою котла: а — горизонтальний; б — вертикальний: 1- циклонний передтопок; 2 — камера допалювання; 3 — топка котла; 4 — шлаковловлюючий пучок; 5 — льотка

Недоліками таких установок є рідке шлакозоловидалення, яке важко організувати на котлах малої потужності. Для охолодження вбудованої камери горіння потрібна вода, теплоту якої в подальшому необхідно використовувати, що ускладнює теплову схему котельної.

## 6. Висновок

Для спалювання на колосникових решітках потрібно використовувати кускове (сортове) або брикетоване паливо. Спалювання несортованого або високозольного вугілля на колосникових решітках супроводжується значним механічним недопалом.

Найкращим паливом для такого типу передтопок є брикетовані відходи біомас або пелети з відходів деревини. Передтопки із щільним шаром доцільно використовувати на котлах невеликої потужності, оскільки при збільшенні потужності габарити передтопку різко збільшуються, що потребує додаткового місця в існуючих котельнях.

Передтопки з киплячим та циркулюючим киплячим шаром потребують допоміжних пристроїв з електроприводами, що для котлів малої потужності потребує додаткової площі для розміщення обладнання та додаткових витрат на власні потреби. Спалювання в киплячому шарі потребує організації відведення тепла, що ускладнює теплову схему та встановлення передтопок на існуючих котлах. Цього можна позбутися при організації в передтопку процесу неповного згоряння з частковою газифікацією. Але при цьому доведеться відмовитись від виведення золи з передтопка, оскільки наявний в ньому коксозольний матеріал містить багато залишкового вуглецю. Коксозольний залишок з КШ-передтопок звичайно скидають до топки котла, де він догорає в факелі продуктів газифікації. Таке рішення видається доцільним для котлів, від початку спроектованих для спалювання вугілля та оздоблених системою золовидалення. КШ-передтопки придатні для використання буровугільної сушонки. Їх основною перевагою видається можливість зв'язування сірки вапняком, але при цьому слід зважити на те, що утворений гіпс не повинен попадати у високо-температурну зону в топці котла.

З наведених способів спалювання твердого палива для спалювання сушонки бурого вугілля найкраще підходить циклонний, або вихровий спосіб. З наведених він відрізняється найменшими необхідними габаритами основного та допоміжного обладнання. Якщо у передтопку реалізується режим повного згоряння, то зола не буде містити вуглець, а пережим на виході з циклону дозволяє запобігти попаданню більшої частини золи в топку котла. Якщо для ефективної термічної обробки газового вугілля без застосування ініціюючого палива зазвичай необхідний рівень температур рідкого шлаку, то для більш реакційноздатного бурого вугілля може виявитись достатнім підтримувати температуру ненабагато менше точки розм'якшення золи. Це значно спрощує процедуру золовидалення і вимоги до матеріалів внутрішньої футерівки.

Для остаточного вибору технології слід знати такі важливі властивості бурого вугілля, як швидкість виходу летких та час вигорання коксозольного залишку.

## Література

1. Майстренко, А.Ю. Техническое обоснование нормативных требований к качеству энергетических углей и ценовая шкала как средство их реализации [Текст]/ А.Ю. Майстренко, Н.В. Чернявский, Н.Г. Стегний // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2007. - №6(6). - С. 3-8.
2. Дубовик, В.С. Стан комунальної теплоенергетики України [Текст]/В.С. Дубовик// Комунальна енергетика України. Стан, проблеми, шляхи модернізації. Т.1. - К.: ІТТФ НАН України, 2007. - С. 22-39.
3. Чернявський, М.В. Заходи і пропозиції щодо заміщення природного газу твердим паливом [Текст]/М.В. Чернявський // Комунальна енергетика України. Стан, проблеми, шляхи модернізації. - К.: ІТТФ НАН України, 2007. - Т.2. - С. 399-418.
4. Гелетуха, Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні [Текст]/ Г.Г. Гелетуха,Т.А. Железна, Ю.Б. Матвеев, М.М. Жовнір//Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. - 2006. - №28(2). - С.85-93.



5. Зах, Р.Г. Котельные установки [Текст]/Р.Г. Зах. - М.: Энергия, 1968. - 352 с.
6. Стырикович, М.А. Котельные агрегаты [Текст]/М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов. - М.: Госэнергоиздат, 1959. - 487 с.
7. Котлер, В.Р. Специальные топки энергетических котлов [Текст]/В.Р. Котлер. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 104 с.
8. Перепелкин, А.В. Факторы оптимизации предтопка с циркулирующим аэрофонтанирующим слоем и реактором термодеструктивного пиролиза [Текст]/А.В. Перепелкин, С.В. Карамнова, Н.В. Чернявский, И.А. Вольчин // Твердотопливные энергетические технологии: Тез. докл. науч.-техн. семинара "Проблемы преобразования энергии и использования органического топлива в энергетике". - Киев: Знание, 1992.- С.9-11.
9. Чернявский, Н.В. Оптимизация режимов работы и экологических показателей термодеструктивного пиролизера энергоустановок с циркулирующим слоем [Текст]/ Н.В. Чернявский, С.Г. Дулиенко, Л.С. Гапонич // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 1998. - № 6(3). - С.17-20.
10. Гапонич, Л.С., Використання термодеструктивного піролізу при двохступеневій термічній переробці кам'яного та бурого вугілля [Текст]/Л.С. Гапонич, М.В. Чернявський // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2000. - № 6(4). - С. 41-46.

**Наведено результати експериментальних досліджень теплообміну малорядних шахових пучків гвинтоподібних труб в діапазоні зміни чисел Рейнольдса від 5000 до 70000. Отримані дані показали збільшення інтенсивності теплообміну при переході від першого до другого – третього рядів пучка. Отримана залежність для розрахунку поправки, що враховує вплив на теплообмін числа поперечних рядів труб у пучку**

**Ключові слова:** труба, пучок, малорядний, гвинтоподібна поверхня, теплообмін, розрахунок

**Приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена малорядных шахматных пучков винтообразных труб в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от 5000 до 70000. Полученные данные показали увеличение интенсивности теплообмена при переходе от первого ко второму – третьему рядам пучка. Получена зависимость для расчета поправки, которая учитывает влияние на теплообмен числа поперечных рядов труб в пучке**

**Ключевые слова:** труба, пучок, малорядный, винтообразная поверхность, теплообмен, расчет

## 1. Вступ

Малорядні пучки труб зазвичай застосовують в калориферах для лісосушильних камер, попереднього підігріву повітря в котлах, в системах вентиляції, кондиціонування і повітряного опалювання громадських будівель і промислових підприємств. Число поперечних рядів труб  $z_2$  за напрямом руху повітря в таких пристроях зазвичай складає 1-4 [1].

Відсутність рекомендацій з визначення впливу кількості поперечних рядів труб  $z_2$  на теплообмін пучків призводить до суперечливих конструкторських рішень при проектуванні теплообмінних пристроїв.

У зв'язку з цим, важливими та актуальними є питання розробки узагальненої залежності для роз-

# ТЕПЛОБМІН МАЛОРЕДНИХ ПУЧКІВ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

УДК 536.24:533.6.011

**С. А. Рева\***

E-mail: reva\_Sergey89@mail.ru

**В. А. Рогаčov**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: teram57@meta.ua

**О. М. Терех**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник\*

E-mail: teram57@meta.ua

**О. В. Алфьорова**

Науковий співробітник

Науково-дослідний інститут телекомунікацій\*\*

E-mail: alolga@meta.ua

\*Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

\*\*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна 03056

рахунку коефіцієнта, що враховує вплив кількості поперечних рядів  $z_2$  на тепловіддачу пучків з нових теплообмінних елементів у вигляді гвинтоподібних труб. Неврахування впливу цього фактора призводить до невіправданого заниження або завищення площі теплообмінної поверхні та відповідно змінення маси трубчастої частини теплообмінника [1].

## 2. Об'єкт досліджень

Для досліджень впливу на теплообмін числа поперечних рядів шахових пучків гвинтоподібних труб [2, 3] застосовувалися експериментальні зразки двох типорозмірів (рис. 1), основні геометричні характеристики яких наведені у табл. 1.